



TITLE:

GPS受信機網による電離圏総電子数データ利用システムの構築

AUTHOR(S):

山本, 衛

CITATION:

山本, 衛. GPS受信機網による電離圏総電子数データ利用システムの構築. 2002

ISSUE DATE:

2002-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/85047>

RIGHT:

p.39-113は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

GPS 受信機網による電離圏総電子数データ利用システムの構築

(研究課題番号 12554016)

平成 12 年度～平成 13 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (B)(2))

研究成果報告書



平成 14 年 3 月

研究代表者 山本 衛
(京都大学宙空電波科学研究センター)

GPS 受信機網による電離圏総電子数データ利用システムの構築

(研究課題番号 12554016)

平成 12 年度～平成 13 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (B)(2))

研究成果報告書

平成 14 年 3 月

研究代表者 山本 衛
(京都大学宙空電波科学研究センター)

I 研究組織

研究代表者

山本 衛 (京都大学宙空電波科学研究センター)

研究分担者

深尾 昌一郎 (京都大学宙空電波科学研究センター)

家森 俊彦 (京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター)

大塚 雄一 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

小川 忠彦 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

宮崎 真一 (国土地理院地理地殻活動研究センター)

II 研究経費

平成12年度 6,000 千円

平成13年度 3,700 千円

III 研究発表

出版論文

- Balan, N., Y. Otsuka, T. Tsugawa, S. Miyazaki, T. Ogawa, K. Shiokawa, and G. J. Bailey, Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan, *Earth, Planets, and Space*, 54, 71-79, 2002.
- Kubota, M., K. Shiokawa, M.K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Sakanoi, H. Fukunishi, M. Yamamoto, S. Fukao, A. Saito, Traveling ionospheric disturbances observed in the OI 630-nm nightglow images over Japan by using a multi-point imager network during the FRONT campaign, *Geophys. Res. Let.* 27, 4037-4040, 2000.
- Noguchi, K., T. Imamura, K.-I. Oyama, A. Saito, Application of the GPS network to estimate the effect of the terrestrial ionosphere on the radio occultation measurements of planetary ionospheres, *Radio Sci.* 36, 1607-1613, 2001.
- Ogawa, T., N. Balan, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C. Ihara, T. Shimomai, and A. Saito, Observations and modeling of 630 nm airglow and total electron content associated with traveling ionospheric disturbances over Shigaraki, Japan. *Earth Planets Space*, 54, 45-56, 2002.
- Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth Planets Space*, 54, 63-70, 2002.
- Sahai, Y., K. Shiokawa, Y. Otsuka, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, A. Saito, Imaging observations of midlatitude ionospheric disturbances during the geomagnetic storm of February 12, 2000, *J. Geophys. Res.*, 106, 24,481-24,492, 2001.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, Kubota, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Tsugawa, S. Fukao, T. Ogawa, M. Ishii, T. Sakanoi, and S. Miyazaki, Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Let.* 28, 689-692, 2001.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki, and M. C. Kelley, Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime *F*-region ionosphere with the MU radar and a GPS network, *Earth Planets Space*, 54, 31-44, 2002.
- Shiokawa K., Y. Otsuka, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, F.J. Rich, A. Saito, and Y. Yumoto, Comprehensive imaging observations of mid-latitude ionospheric disturbances during storm-time substorms, *J. Geophys. Res.*, 105, 27,067-27,080, 2000.

Shiokawa, K., M.K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Kubota, K. Igarashi, A. Saito, T. Nakamura, Multi-point observation of short-period mesospheric gravity waves over Japan during the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.* 27, 4057-4060, 2000.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, M. K. Ejiri, Y. Sahai, T. Kadota, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, and A. Saito, Imaging observations of the equatorward limit of midlatitude traveling ionospheric disturbances, *Earth Planets Space*, 54, 57-62, 2002.

IV 研究の目的と成果の概要

IV-1. 研究の目的

本研究は、全国に設置された国土地理院 GPS 受信機網の観測データを用いて我が国上空の電離圏の総電子数分布を自動的に算出・蓄積する「電離圏総電子数データ利用システム」を開発・構築することを目的とした。

わが国では、国土地理院によって全国約千地点に GPS 受信機が設置・運用されている。平均的な地点間距離が 25km というこの GEONET (国土地理院 GPS 連続観測システム) は、その受信機分布の密度とカバーする範囲の広さの両面において世界に類のないネットワークであり、その測位データは主として地殻変動あるいは地震研究のデータベースとして活用されてきた。

GPS 測位で利用される電波は地球大気を通過して地上で受信される。電離圏を通過する電波は電離大気の影響をうけるために測位結果に誤差をもたらすが、GPS システムは、個々に電離圏の影響を受けた 2 周波の電波を用いることで、この誤差を補正している。つまり GEONET データには、位置情報だけではなく衛星から各受信点に至る径路の総電子数 (TEC: Total Electron Content) の情報が含まれている。しかしながら、国土地理院では測位データのみを利用している状況であり、GEONET データから得られる電離圏総電子数データについては殆ど手がつけられてこなかった。研究代表者らは、MU レーダーを用いた電離圏研究を進める過程において GEONET による電離圏総電子数観測の可能性に気づき、研究を進めてきており、GPS の測位データから総電子数を算出する手法をほぼ確立しており、そのデータを元にした大気はどのような観測から超高層大気・電離圏研究に対する GEONET データ利用の有用性を示していた。

本研究では、長期間にわたる総電子数データベースを構築を行い、統計的手法等によって様々な超高層大気現象の研究を進めるための基盤づくりを目的とし、データベースの簡便な利用のためのシステムづくりも進め、海外を含めた多くの研究者から容易に総電子数データを利用できるような体制を整えることを目指した。

IV-2. 研究成果の概要

本研究では、国土地理院の GEONET が全国約千地点において 30 秒毎に取得している測位データを利用して、日本上空の総電子数分布を水平分解能 20km × 時間分解能 30 秒で準リアルタイムに求め、その大量のデータを蓄積するシステムを開発した。また総電子数データ利用プログラムや WWW を通じたクイックルック・プロット提供システムを開発し、総電子数データの扱いに詳しくない研究者でも利用可能な環境を整備した。更に、本研究によって蓄積される大量の総電子数データを用いて、電離圏 TID の分布・性質に関する統計解析や、太陽活動に伴う電離圏擾乱等の特徴的な太陽地球環境現象の研究をすすめた。

1. 手法の開発

国土地理院 GEONET の約 1000 点の受信機の GPS 観測データより全電子数 (Total Electron Content: TEC) を求める手法の開発を行った。TEC 算出の方法については「IV-3. GPS データによる全電子数データの算出手法」に詳細を記述した。GEONET のデータ・サンプリングは 30 秒間隔であり、TEC の算出には感度の点から主に 2 周波の搬送波の位相情報を使用している。TEC 算出の際の問題点は、絶対値を決めるための補正と視線方向の観測値の鉛直方向への変換である。

(a) 全電子数データ変動成分の算出

GEONET の高い受信機密度を生かして、小さな空間スケールの現象を高い感度で測定するため、まずは絶対値の推定は行わず、大規模な構造とバイアスを取り除いた変動成分の算出を行った。鉛直 TEC への変換の誤差を抑えるため天頂角の小さい (30 度または 45 度) データのみを使用した。これにより、0.15 度 \times 0.15 度の空間分解能、30 秒の時間分解能で 2.4×10^4 個/m² の精度での TEC 変動成分の 2 次元分布が求められた。これらのデータは各観測点ごと一日分を一ファイルとした TEC ファイルと全観測点のデータから日本上空の二次元分布を現した GRID ファイルとしてデータベースに蓄積されている。絶対値の推定を行わないため、その推定からの誤差を含まないため、精度が良く、短い時間スケール、小規模な変動の解析に適している。

(b) 全電子数絶対値データの算出

絶対値の推定に際しては、GEONET の受信機が多数であるためにデータ量が大きい事が問題である。そのため多数の受信機のバイアスを効率的に推定するための手法を開発した [Otsuka et al., 2002]。個々の受信機から最少自乗法により求めた結果を他の近接する受信機の結果と比較することによって推定精度を高めている。ここで得られた絶対値 TEC の精度はおよそ 2-3 TEC unit (10^{16} 個/m²) である。算出に際して、ある程度の範囲において TEC の空間勾配がないこと、電離層が薄層で近似できることを仮定していることが主な誤差の要因と考えられるこのため、時刻や衛星の配位により精度は異なる。これらのデータは各観測点ごと一日分を一ファイルとした ATEC ファイルと全観測点のデータから日本上空の二次元分布を現した AGRID ファイルとしてデータベースに蓄積されている。

(c) 全電子数絶対値データの評価

上記の様に全電子数絶対値データにはいくつかの誤差要因があるために、そのデータの信頼度および精度の評価が重要である。

i. IRI (International Reference Ionosphere) モデルとの比較

電離圏電子密度の経験モデルである IRI と、GPS より算出した TEC の比較を行った [Otsuka et al., 2002]。

ii. SUPIM (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model) との比較

GPS 衛星の軌道は高度 20,000km であるため、GPS により測られる TEC には、高度 90km-1,000km の電離圏の全電子数に加え、それより上空のプラズマ圏の全電子数を含んでいる。そのプラズマ圏の寄与を SUPIM を用いて見積もった [Balan et al., 2002]。

iii. Ionosonde 観測との比較

電離圏の標準的な観測手法である ionosonde から得た、電離圏 F 領域の最大電子密度と TEC の比較を行った。その結果、日本の中央部である国分寺の ionosonde から得られた foF2 から得られる電離圏最大電子密度の変動と GPS 受信機網から得られた全電子数の変動には良い相関がある事が分かった。これは、電離圏が Chapman 理論に乗った電子密度分布をしていると仮定すると、GPS 受信機網から推定された全電子数が ionosonde 観測と一致している事を示している。

(d) データベース化

1999 年 4 月以降の全 GEONET データに対して TEC の算出が行われている。各受信機ごとの TEC 絶対値データ (ATEC ファイル)、TEC データ (バイアス未補正: TEC ファイル) と日本上空の 2 次元 TEC 絶対値分布 (AGRID ファイル)、TEC 変動成分分布 (GRID ファイル) のデータとプロットが www サーバー (<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp>) を通して利用できる。利用に際しては、国土地理院への利用申請が必要である。これらデータのプロット・ルーチンも上記 WWW にて提供されている。また、WWW 上で任意の時刻、観測点についてプロットを作成することも可能である。

2. 全電子数データベースを用いた電離圏現象の研究

GEONET TEC を用いて中緯度の電離圏現象の研究が進められた。焦点は伝搬性電離圏擾乱などの不規則構造の 2 次元構造などであった。

(a) MSTIDs (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances): [Saito et al., 2001, 2002]

日本上空において南西に伝搬する構造が夜間に見られ、その内部で強い分極電場が作られ、小規模なイレギュラリティが発生していることは知られていたが、GEONET の観測により、それらが夏の夜にはほぼ毎晩おこっており、北海道から九州まではっきりした波面を作って伝搬している事が分かった。また冬の昼には南南東に伝搬する構造が多いことも分かった。他の経度域の中緯度地域でも同様の構造が見られることも明らかになったが、どうして、真夜中付近の時間帯にあらわれいつも南西に伝搬するか、どこで波が作られているか等の、伝搬方向、地方時依存性、季節依存性、太陽活動度依存性の物理機構に付いては解明されていない。

(b) 地磁気擾乱時: [Shiokawa et al. 2000; Shahai et al., 2001]

高緯度域での地磁気擾乱に伴って TEC の変動や LSTIDs (large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances) の通過などが観測された。これらは、磁気圏からの電場によって強められた電離圏電場や高緯度での加熱による中性風系の変化や大気重力波の生成によると考えられている。

(c) 電離圏不規則構造:

30 秒サンプリングのデータを用いて数分スケールの小規模なイレギュラリティの研究が行なわれている。特に地磁気擾乱時の低緯度域では激しい変動が出現することが明らかになった。

3. 他の観測との比較

(a) 全天カメラ [Shiokawa et al., 2000; Ogawa et al., 2002; Saito et al., 2001]

630nm 帯大気光 (発光高度 250km-300km) の全天カメラによる観測と TEC の比較によ

り TEC の変動を起こす電子密度の変動の高度分布を推定することが出来る。中性大気分布を MSIS モデル等を用いて仮定することで絶対輝度と TEC 絶対値とを定量的に比較することが出来る。MSTID の電子密度変動は F 領域の下部で強くおこっていることが分かった。

(b) MU レーダー [Saito et al., 2002]

MU レーダーの電子密度高度プロファイル観測の時間分解能は 10 分ほどであるが、夜間は電子密度が低い事、イレギュラリティによるサイド・ローブ・エコーがある事により、測定は制限される。MU レーダーによる電子密度高度プロファイルから得た TEC と GPS より得た TEC の比較により、MSTID による TEC の変動は主に F 領域下部でおこっている事が分かった。

また、MU レーダーの Coherent 観測によって、3-m スケールのイレギュラリティが MSTID とともに南西に伝搬する事が明らかになった。

4. TEC データの他の分野への応用

(a) 補正 [Noguchi et al., 2001]

GEONET TEC により地球電離圏の TEC を正確に推定し、人工衛星や木星からの電波の地球電離圏による影響を見積もることがされている。

また、Noguchi et al. [2001] では、地球電離圏 TEC の変動特性を調べ、地球電離圏による電波への障害の度合いとその季節・地方時依存性が得られている。

(b) 地震に関連する電離圏全電子数の変動

地震にまつわる TEC 変動がロシアなどの研究者により報告されており、全電子数データベースを利用した解析も進められているが、現在のところ特に地震にまつわる顕著な変動は解明されていない。

IV-3. GPS データから全電子数データの算出手法

GPS による TEC の算出手法

京大理 津川 卓也

1. GPS (Global Positioning System)

米国が開発した人工衛星による位置決定のためのシステム。

- ・ 軌道高度……………約 20,000km
- ・ 衛星総数……………24 個 (+予備)
- ・ 衛星軌道面……………6 面 (1 面に 4 衛星)
- ・ 軌道傾斜角……………55°
- ・ 周回周期……………11 時間 58 分 02 秒 (0.5 恒星日)

GPS のデータは RINEX (Receiver-Independent Exchange format) という format で統一されている。これは受信機によって異なっていた data format を統一したもので、ASCII file 形式である。

衛星が発信する搬送波 (carrier) には以下の 2 周波があり、それぞれに測位用の信号 (C/A コード、P コード) が乗せられている。

- ・ L1 band [1575.42 MHz]
- ・ L2 band [1227.6 MHz]

2. GPS による測位方法

GPS による測位には 2 種類の方法

- ・ 擬似距離を測定する方法
- ・ 位相差を測定する方法

がある。

2.1 擬似距離(pseudorange)を測定する

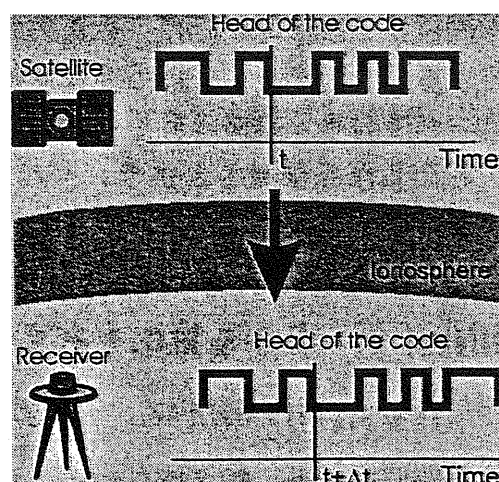
衛星には原子時計が搭載されており、正確なタイミングで測位用信号を発信する。

その信号には

- ・ 衛星の位置情報
- ・ 衛星が信号を送った正確な時刻

が含まれており、これを受け取る受信機が自分の時計と比較することで時間差を

測定し、擬似距離 (pseudorange) が算出される (Figure 1)。擬似距離は、衛星-受信



$$\begin{aligned} \text{擬似距離}(\Delta t \cdot c) &= \text{真の距離} \\ &+ \text{電離圏での遅れ} + \text{対流圏での遅れ} \\ &+ \text{送受信機のバイアス} \end{aligned}$$

Figure 1 擬似距離の測定

機間の真の距離の他に、電離層での遅れ分(→TEC)、対流圏での遅れ分(→水蒸気量)、衛星および受信機内における時計誤差分の距離が含まれる。単独測位(カーナビなど)の用途ではある瞬間に4つの衛星からデータが得られれば、4つの未知数(3次元座標と時間)がわかるのでその受信機の絶対的な位置がわかる。

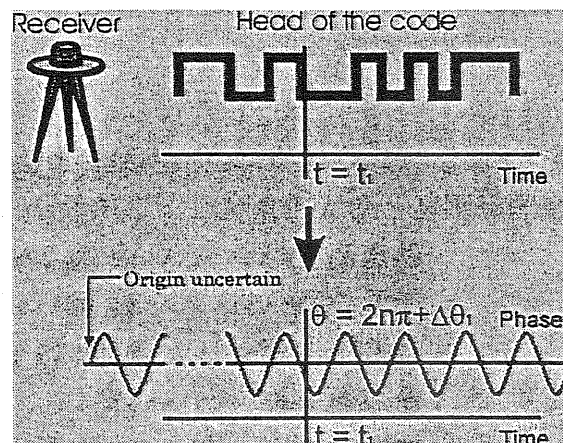
2.2 搬送波の位相差を測定する

搬送波の波長(L1: 0.19m、L2: 0.24m)は、搬送波に乗っている信号(P: 29.3m、C/A: 293m)に比べて2~3桁程度短いので、搬送波を用いた測定の方が測距の分解能はよい。

衛星からの信号が到着した瞬間の位相を測定することによって位相差を測定する。しかし、実質的波長の短さゆえの多重解問題が生じる。例えばL1帯を使うと、多重解が約20cmおきに現れるので、位相の原点がどこにあるのかわからなくなるのである。これを位相不確定(phase ambiguity)または整数値バイアス(integer bias)とよぶ。しかし、その瞬間の位相は正しいので、以下のことが言える。

- ・波数の少数部分の差は本当の行路差の少数部分
- ・行路差の整数部分は本当かどうかわからない

位相測定をつづけていけば、波数の整数部分の繰り上がりは小数部分の変化からカウントできる。したがって一連の搬送波位相に対する整数値バイアスは一定である。しかし、電波が障害物で遮蔽されるなどの理由で位相測定が中断されると、その間の繰り上がりがわからなくなってしまう。これをサイクルスリップ(cycle slip)とよび、受信機の構造で必ず整数になるようにされている。



位相測定による距離 = 真の距離
+ 電離層での遅れ + 対流圏での遅れ
+ 整数値バイアス + 送受信機のバイアス

Figure 2 搬送波位相の測定

3. RINEX データから算出される TEC データ

2つの周波数 f_1 (1575.42MHz)、 f_2 (1227.60MHz)を用いると、任意の衛星 s 、受信機 r における擬似距離 P_i 、搬送波位相による距離 L_i は以下のように表される。

$$P_1 = \rho + \sigma + I/f_1^2 + \tau_1^r + \tau_1^s \quad (1)$$

$$P_2 = \rho + \sigma + I/f_2^2 + \tau_2^r + \tau_2^s \quad (2)$$

$$L_1 = \rho + \sigma - I/f_1^2 + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_1^r + \varepsilon_1^s \quad (3)$$

$$L_2 = \rho + \sigma - I/f_2^2 + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_2^r + \varepsilon_2^s \quad (4)$$

- ρ : 真の距離
 σ : 対流圏での遅れ
 $\pm I/f_i^2$: 電離圏での遅れ (+: 擬似距離、 -: 位相)
 τ_i, ε_i : 衛星、受信機に固有のバイアス
 $\lambda_i n_i$: 整数値バイアス (λ_i : 搬送波の波長)
($i=1,2$)

ここで、電離層での遅れの項 ($\pm I/f_i^2$) の定数 I は、

$$I = 40.3 T \quad (5)$$

と表される。 T は伝搬経路に沿って積分した電子密度、すなわち slant TEC である (→ Appendix A)。

(1)、(2)式より、

$$\begin{aligned}
 P_2 - P_1 &= I \left(\sqrt{f_2^2 - 1/f_1^2} \right) + b_r + b_s \\
 b_r &= \tau_2^r - \tau_1^r, \quad b_s = \tau_2^s - \tau_1^s
 \end{aligned} \quad (6)$$

(3)、(4)式より、

$$\begin{aligned}
 L_1 - L_2 &= I \left(\sqrt{f_2^2 - 1/f_1^2} \right) + (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2) + b'_r + b'_s \\
 b'_r &= \varepsilon_1^r - \varepsilon_2^r, \quad b'_s = \varepsilon_1^s - \varepsilon_2^s
 \end{aligned} \quad (7)$$

(6)、(7)式から slant TEC、 T が求まる。

$$T = A(P_2 - P_1) - A(b_r + b_s) \quad (8)$$

$$T = A(L_1 - L_2) - A(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2 + b'_r + b'_s) \quad (9)$$

$$A = 40.3^{-1} \left(\sqrt{f_2^2 - 1/f_1^2} \right)^{-1}$$

位相差から求めた slant TEC(9)の方が、TEC の変動をより正確に表すが、整数値バイアスが含まれるため、絶対値は定まらない。そのため、TEC データにする場合は、位相差で求めた slant TEC(9)の値を、各衛星-受信機間の擬似距離で求めた slant TEC(8)の平均値で補正した値で記録されている。TEC データも、RINEX 同様に ASCII file 形式である。

測位における電離圏誤差は $I/f^2 (= 40.3T/f^2)$ の項で表されるので、1TECU (10^{16} el/m²) あたり、L1 帯(1575.42MHz)で約 16cm、L2 帯(1227.6MHz)で約 27cm の誤差が生じることになる。

Appendix

電離圏における電波遅延

電離圏における電波の群速度 d_g 、位相の遅れ d_p は、以下のように求められる。

電波の屈折率 n は、cold plasma の分散関係式 (Appleton-Hartree eq.) から導かれる。

$$n^2 = 1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

n : 電離媒質中の屈折率

f_p : 電離媒質のプラズマ周波数

f : 電磁波の周波数

ここでは、電波吸収項、地球磁場の効果を無視した分散関係式を用いている。

プラズマ周波数 f_p は、

$$f_p \equiv \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{v}{2\pi\lambda_D} \quad (\text{A.2})$$

ω_p : プラズマ角周波数

v : 熱速度 (1 次元)

λ_D : Debye 長

熱速度 v 、Debye 長 λ_D は、以下のように表される。

$$v = \left(\frac{k_B T_e}{m_e} \right)^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

$$\lambda_D = \left(\frac{k_B T_e}{4\pi e^2 N_e} \right)^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

k_B : ボルツマン定数

T_e : 電子温度

m_e : 電子質量

N_e : 電子数密度

(A.3)、(A.4)を用いて (A.2) を書き換えると、

$$f_p = \left(\frac{e^2 N_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \equiv (80.5 N_e)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

$e = 4.803 \times 10^{-10} \text{ esu}$

$m_e = 9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$

群速度、位相速度に対する屈折率 n_g 、 n_p は、

$$n_g = \frac{1}{n} = \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \quad (\text{A.6})$$

$$n_p = n = \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \quad (\text{A.7})$$

最後の式変形は、 $f \gg f_p$ を仮定している。

電波の群速度に対する遅れ d_g 、位相の遅れ d_p は、

$$d_g = \int (n_g - 1) dl = \int \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 dl = \int \frac{40.3 N_e}{f^2} dl \quad (\text{A.8})$$

$$d_p = \int (n_p - 1) dl = - \int \frac{1}{2} \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 dl = - \int \frac{40.3 N_e}{f^2} dl \quad (\text{A.9})$$

ここで、 l は媒質中における電波の伝搬経路長である。 N_e が l の関数であると考えて

$N_e = N_e(l)$ とすると、伝搬経路に沿って積分した電子密度 (slant TEC) T は、

$$T \equiv \int N_e(l) dl \quad (\text{A.10})$$

と定義される。

(A.10) を用いると、(A.8) および (A.9) は、以下のように書き換えられる。

$$d_g = \frac{40.3T}{f^2} \quad (\text{A.11})$$

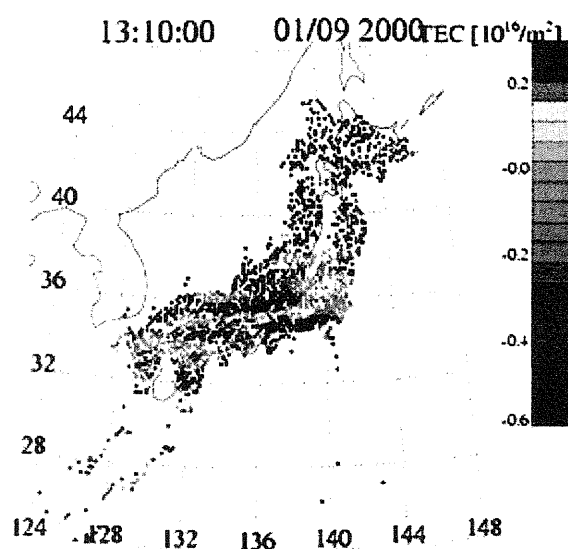
$$d_p = - \frac{40.3T}{f^2} \quad (\text{A.12})$$

IV-4. データベース・サービスの概要

一般利用者向けのデータベース・ホームページ

<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

GEONET Total Electron Content



- GPS TEC meeting on 3/25 in Kyoto

- Two-dimensional TEC map over Japan (since April 20, 1999)

(UT)

TEC : List of Absolute value of TEC

Perturbation TEC : List of High-pass Filtered TEC (one-hour cut-off period)

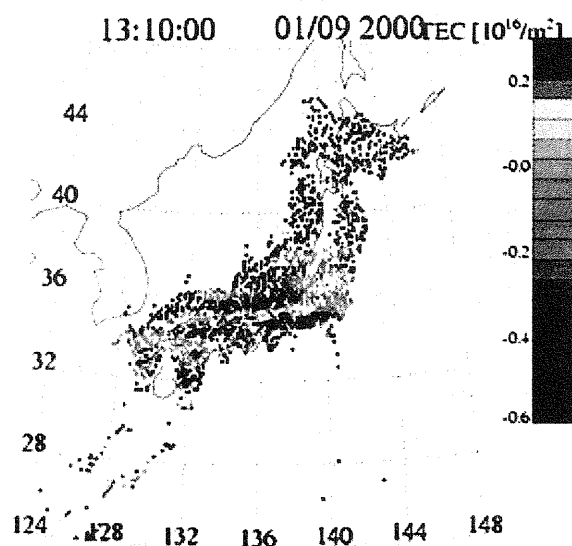
- One-dimensional plot

Update at Apr 16, 2001

For questions and comments, please contact:
Akinori Saito; saitoua@kugi.kyoto-u.ac.jp

登録データ利用者向けのデータベース・ホームページ

GEONET Total Electron Content



● データ使用について

国土地理院の観測データを使用しているため、国土地理院への利用申請と謝辞が必要です。詳細。

● プロット・アーカイブ (1999年4月20日以降)

2001	Jan	1	(UT)
Perturbation TEC [GIF]			Display

TEC : 絶対値TECプロットのリスト
High : 変動成分プロット (一時間ハ
Pass イパス フィルター) のリスト

● データ・アーカイブ (ftp)

TEC絶対値 (バイアス推定をしたも

の)

TEC : 視線方向TEC値、1観測点1日分

GRID : Binary形式、緯度経度GRID上、鉛直TEC値

BIAS : 推定した受信機・送信機内部の遅れによるバイアス。TEC絶対値の1時間平均値も含む。1観測点1日分

TEC観測値 (バイアス推定をしていないもの)

TEC : 視線方向TEC値、1観測点1日分 (バイアスを含む)

GRID : ハイパスフィルターをかけて得られたTECの変動成分。Binary形式、緯度経度GRID上、鉛直TEC値

orbit : IGSによるGPS衛星位置ファイル、1日分

● プロット・ページ

TECライン・プロット : 緯度経度指定し、その近くの観測点のTEC値をプロット。

TECライン・プロット (複数受信機) : 始点と終点の緯度経度を指定し、その直線上の観測点のTEC値をプロット。

● プロット・ルーチン (IDL)

TECライン・プロット : ある観測点のTEC値をプロット。TECファイル使用。

2次元分布 : 緯度経度GRID上の鉛直TEC値を地図上にプロット。GRIDファイル使用。

GPS衛星軌道 : ある観測点が観測している位置を地図上にプロット。GPS衛星位置ファイル使用。

● 変換ルーチン(Fortran)

RNX2TEC : RINEXからTEC(バイアスを含む)
TEC2GRD : TEC(バイアスを含む)からGRID(ハイパス フィルター)
TEC2BIAS : TEC(バイアスを含む)からBIAS
T_B2ATEC : TEC(バイアスを含む)とBIASから絶対値TEC
ATEC2GRD : TEC(絶対値)からGRID(絶対値)

● その他

readGRID : GRIDファイル 読み込みルーチン
gpsdate : 年月日より年通算日、GPS週を出すc-shell script

Update at Apr 16, 2001
ご質問などは saitoua@kugi.kyoto-u.ac.jpまで。

2次元プロットリストページ

<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/figs/Hpass/>

GEONET perturbation TEC plot

1995

Nov 20 Nov 21

1996

Aug 17 Aug 19

1997

May 12 May 13 May 14 Jun 11 Jun 12 Jun 27 Jun 29 Jul 2 Jul 3 Jul 13 Dec 25

1998

Jan 30 Jan 31 Feb 1 Feb 6 Apr 26 Apr 27 Apr 28 Apr 29 Apr 30 May 1 May 16 May 17 May 18 May 19 May 20 May 21 May 22 May 23 May 24 Jun 23 Jun 24 Jun 25 Jun 26 Aug 25 Aug 26 Aug 27 Sep 21 Sep 22 Sep 23 Sep 24 Sep 25 Dec 7 Dec 8 Dec 9 Dec 10 Dec 11

1999

Jan 1 Jan 2 Jan 3 Jan 4 Jan 6 Jan 7 Jan 8 Jan 9 Apr 20 Apr 21 Apr 22 Apr 23 Apr 24 Apr 25 Apr 26 Apr 27 Apr 28 Apr 29 Apr 30 May 1 May 2 May 3 May 4 May 5 May 6 May 7 May 8 May 9 May 10 May 11 May 12 May 13 May 14 May 15 May 16 May 17 May 18 May 19 May 20 May 21 May 22 May 23 May 24 May 25 May 26 May 27 May 28 May 29 May 30 May 31 Jun 1 Jun 2 Jun 4 Jun 5 Jun 6 Jun 7 Jun 8 Jun 9 Jun 10 Jun 11 Jun 12 Jun 13 Jun 14 Jun 15 Jun 16 Jun 17 Jun 18 Jun 19 Jun 20 Jun 21 Jun 22 Jun 23 Jun 24 Jun 25 Jun 26 Jun 27 Jun 28 Jun 29 Jun 30 Jul 1 Jul 2 Jul 3 Jul 4 Jul 5 Jul 6 Jul 7 Jul 8 Jul 9 Jul 10 Jul 11 Jul 12 Jul 13 Jul 14 Jul 15 Jul 16 Jul 17 Jul 18 Jul 19 Jul 20 Jul 21 Jul 22 Jul 23 Jul 24 Jul 25 Jul 26 Jul 27 Jul 28 Jul 29 Jul 30 Jul 31 Aug 1 Aug 2 Aug 3 Aug 4 Aug 5 Aug 6 Aug 7 Aug 8 Aug 9 Aug 10 Aug 11 Aug 12 Aug 13 Aug 14 Aug 15 Aug 16 Aug 17 Aug 18 Aug 19 Aug 20 Aug 21 Aug 22 Aug 23 Aug 24 Aug 25 Aug 26 Aug 27 Aug 28 Aug 29 Aug 30 Aug 31 Sep 1 Sep 2 Sep 3 Sep 4 Sep 5 Sep 6 Sep 7 Sep 8 Sep 9 Sep 10 Sep 11 Sep 12 Sep 13 Sep 14 Sep 15 Sep 16 Sep 17 Sep 18 Sep 19 Sep 20 Sep 21 Sep 22 Sep 23 Sep 24 Sep 25 Sep 26 Sep 27 Sep 28 Sep 29 Sep 30 Oct 1 Oct 2 Oct 3 Oct 4 Oct 5 Oct 6 Oct 7 Oct 8 Oct 9 Oct 10 Oct 11 Oct 12 Oct 13 Oct 14 Oct 15 Oct 16 Oct 17 Oct 18 Oct 19 Oct 20 Oct 21 Oct 22 Oct 23 Oct 24 Oct 25 Oct 26 Oct 27 Oct 28 Oct 29 Oct 30 Oct 31 Nov 1 Nov 3 Nov 4 Nov 5 Nov 6 Nov 7 Nov 8 Nov 9 Nov 10 Nov 11 Nov 12 Nov 13 Nov 14 Nov 15 Nov 16 Nov 17 Nov 18 Nov 19 Nov 20 Nov 21 Nov 22 Nov 23 Nov 24 Nov 25 Nov 26 Nov 27 Nov 28 Nov 29 Nov 30 Dec 3 Dec 4 Dec 5 Dec 6 Dec 7 Dec 8 Dec 9 Dec 10 Dec 11 Dec 12 Dec 13 Dec 14 Dec 15 Dec 16 Dec 17 Dec 18 Dec 19 Dec 20 Dec 21 Dec 22 Dec 23 Dec 24 Dec 25 Dec 26 Dec 27 Dec 28 Dec 29 Dec 30 Dec 31

2000

Jan 1 Jan 2 Jan 3 Jan 4 Jan 5 Jan 6 Jan 7 Jan 8 Jan 9 Jan 10 Jan 11 Jan 12 Jan 13 Jan

2次元プロットページ (一日分)

May 12 May 13 May 14 May 15 May 16 May 17
May 18 May 19 May 20 May 21 May 22 May 23
May 24 May 25 May 26 May 27 May 28 May 29
May 30 May 31
Jun 1 Jun 2 Jun 3 Jun 4 Jun 5 Jun 6
Jun 7 Jun 8 Jun 9 Jun 10 Jun 11 Jun 12
Jun 13 Jun 14 Jun 15 Jun 16 Jun 17 Jun 18
Jun 19 Jun 20 Jun 21 Jun 22 Jun 23 Jun 24
Jun 25 Jun 26 Jun 27 Jun 28 Jun 29 Jun 30
Jul 1 Jul 2 Jul 3 Jul 4 Jul 5 Jul 6
Jul 7 Jul 8 Jul 9 Jul 10 Jul 11 Jul 12
Jul 13 Jul 14 Jul 15 Jul 16 Jul 17 Jul 18
Jul 19 Jul 20 Jul 21 Jul 22 Jul 23 Jul 24
Jul 25 Jul 26 Jul 27 Jul 28 Jul 29 Jul 30
Aug 1 Aug 2 Aug 3 Aug 4 Aug 5 Aug 6
Aug 7 Aug 8 Aug 9 Aug 10 Aug 11 Aug 12
Aug 13 Aug 14 Aug 15 Aug 16 Aug 17 Aug 18
Aug 19 Aug 20 Aug 21 Aug 22 Aug 23 Aug 24
Aug 25 Aug 26 Aug 27 Aug 28 Aug 29 Aug 30
Sep 1 Sep 2 Sep 3 Sep 4 Sep 5 Sep 6
Sep 7 Sep 8 Sep 9 Sep 10 Sep 11 Sep 12
Sep 13 Sep 14 Sep 15 Sep 16 Sep 17 Sep 18
Sep 19 Sep 20 Sep 21 Sep 22 Sep 23 Sep 24
Sep 25 Sep 26 Sep 27 Sep 28 Sep 29 Sep 30
Oct 1 Oct 2 Oct 3 Oct 4 Oct 5 Oct 6
Oct 7 Oct 8 Oct 9 Oct 10 Oct 11 Oct 12
Oct 13 Oct 14 Oct 15 Oct 16 Oct 17 Oct 18
Oct 19 Oct 20 Oct 21 Oct 22 Oct 23 Oct 24
Oct 25 Oct 26 Oct 27 Oct 28 Oct 29 Oct 30
Nov 1 Nov 2 Nov 3 Nov 4 Nov 5 Nov 6
Nov 7 Nov 8 Nov 9 Nov 10 Nov 11 Nov 12
Nov 13 Nov 14 Nov 15 Nov 16 Nov 17 Nov 18
Nov 19 Nov 20 Nov 21 Nov 22 Nov 23 Nov 24
Nov 25 Nov 26 Nov 27 Nov 28 Nov 29 Nov 30
Dec 1 Dec 2 Dec 3 Dec 4 Dec 5 Dec 6
Dec 7 Dec 8 Dec 9 Dec 10 Dec 11 Dec 12
Dec 13 Dec 14 Dec 15 Dec 16 Dec 17 Dec 18
Dec 19 Dec 20 Dec 21 Dec 22 Dec 23 Dec 24
Dec 25 Dec 26 Dec 27 Dec 28 Dec 29 Dec 30
Dec 31

GEONET TEC

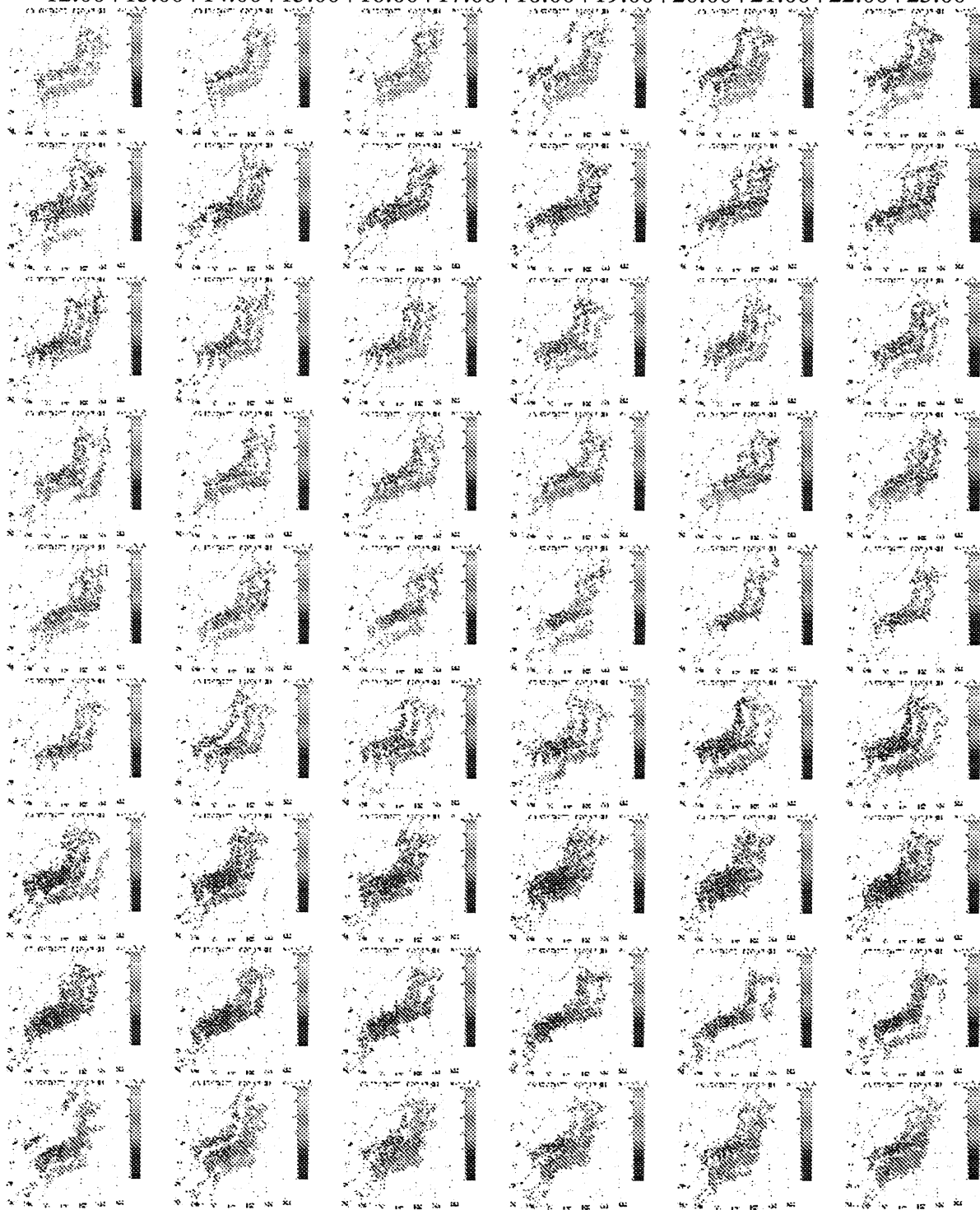
23 Jul 2001 (204_2001)

Top

Previous Day | Next Day

MPEG Animation normal (2.04 MByte) slow (2.89 MByte)

00:00 | 01:00 | 02:00 | 03:00 | 04:00 | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 09:00 | 10:00 | 11:00
12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 | 22:00 | 23:00



2次元プロットページ（一時間分）

GEONET TEC

23 Dec 2000 (358_2000) 04:00 UT

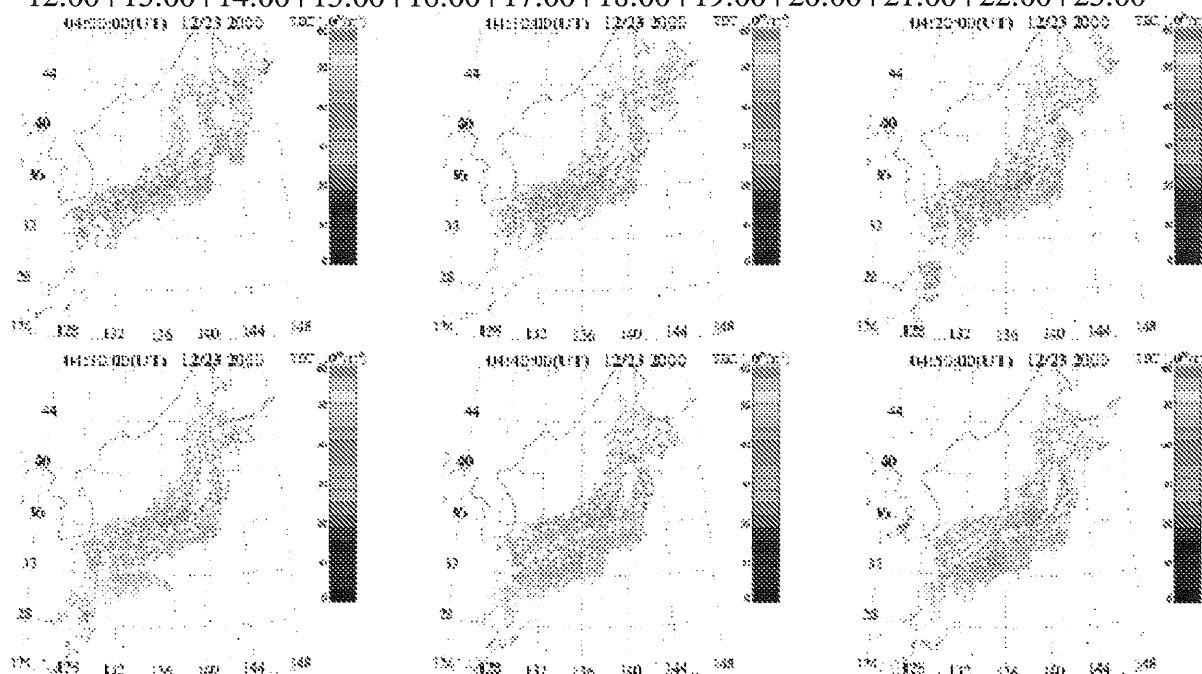
Top

Previous Day | 23 Dec 2000 | Next Day

Previous Day 23:00 UT | Next Day 00:00 UT

00:00 | 01:00 | 02:00 | 03:00 | 04:00 | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 09:00 | 10:00 | 11:00

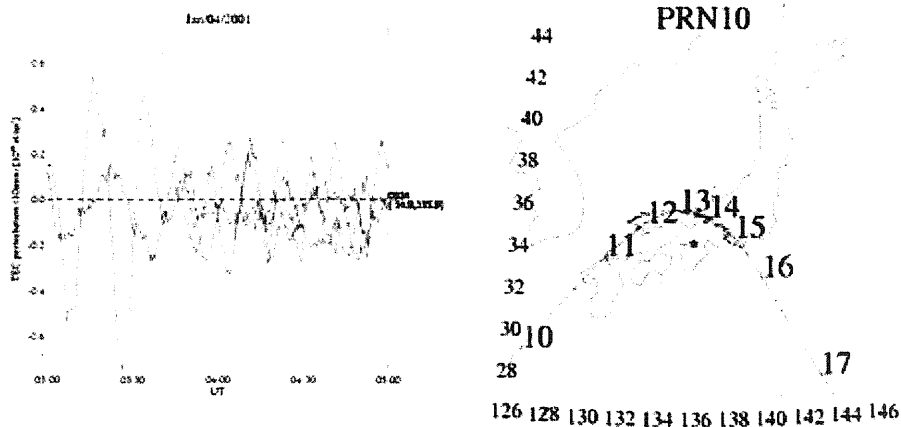
12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 | 22:00 | 23:00



対話型全電子数データ・プロット作成ページ（一観測点）

<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/tec/>

GEONET Total Electron Content



Plot period: / / — (UT=JST-9)

Latitude: . Longitude: .

Data Type:

Plot Type:

Approximate processing time: 30 seconds

Dst index: WDC for geomagnetism, Kyoto

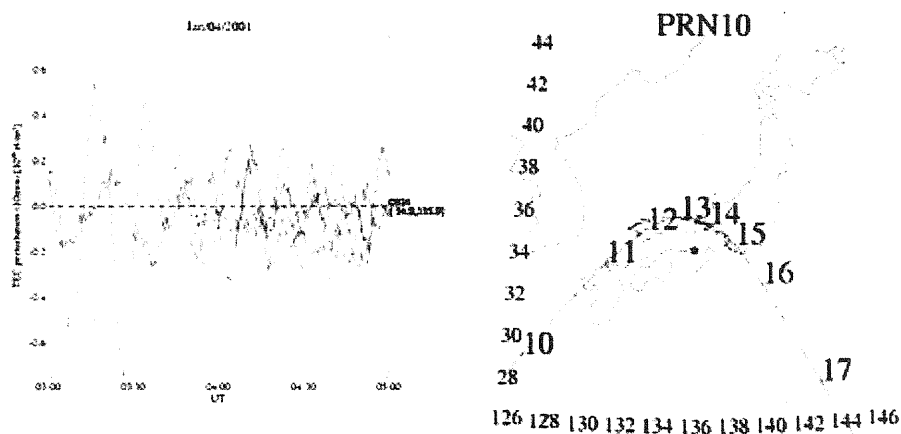
[Home](#)

For questions and comments, please contact:
Akinori Saito; saitoua@kugi.kyoto-u.ac.jp

対話型全電子数データ・プロット作成ページ (複数観測点)

<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/tec/multi.html>

GEONET Total Electron Content



Plot period: / / - (UT=JST-9)

Start Point

Latitude: . Longitude: .

End Point

Latitude: . Longitude: .

Data Type:

Plot Type:

Approximate processing time: 60 seconds

Dst index: WDC for geomagnetism, Kyoto

[Home](#)

For questions and comments, please contact:
Akinori Saito; saitoua@kugi.kyoto-u.ac.jp

IV-5. データファイル形式

RINEX データ

RINEX file : 0001068.02o										受信機名 (4) +日 (3). 年 (2) +o	
2.00		OBSERVATION DATA		G (GPS)		RINEX VERSION / TYPE				観測点名	
DAT2RIN 2.35x		GSI, JAPAN		09MAR02 16:13:17		GMTPGM / RUN BY / DATE					観測点の 3 次元座標値
GSI, JAPAN		GEOGRAPHICAL SURVEY INSTITUTE, JAPAN		OBSERVER / AGENCY							
440101351		TRIMBLE 5700		Nav 1.05 Sig 0.00		REC # / TYPE / VERS					
		TRM41249.00		ANT # / TYPE							
0001						MARKER NAME					
						MARKER NUMBER					
-3522845.0167		2777141.5661		4518959.0276		APPROX POSITION XYZ					
0.0000		0.0000		0.0000		ANTENNA: DELTA H/E/N					
1		1						WAVELENGTH FACT L1/2			
4		L1		C1		L2		P2			
30.0000						# / TYPES OF OBSERV				観測量の種類数/観測量 サンプリング間隔 (秒)	
						INTERVAL					
2002		3		9		0		0		観測開始時間	
0.0000000								GPS			
HP-UX 10.20 PA-RISC cc A.10.32.03 += =										COMMENT	
***** RINEX HEADER SPECIFICATION 1.00 *****										COMMENT	
										END OF HEADER	
(エポック1の観測日時) (フラグ) (衛星数) (各エポックで測定された衛星番号)											
(02 3 9 0 0 0.0000000) (0) (9G) (1G 2G 3G13G15G17G22G25G31)											エポック 1 衛星 PRN1 による観測量 衛星 PRN2 衛星 PRN3 衛星 PRN13 衛星 PRN15 衛星 PRN17 衛星 PRN22 衛星 PRN25 衛星 PRN31 エポック 2
-19012371.666 23282028.969 -14792202.9624 23282034.2034											
-20059488.864 22333773.945 -15610299.0404 22333776.2234											
-29405637.893 20488342.148 -22886235.5684 20488343.6844											
-10611214.715 23501437.734 -8249844.7244 23501441.9304											
-21574253.491 21813118.625 -16787240.0654 21813121.3794											
-19466956.219 22672753.922 -15147494.2964 22672757.9924											
-38120076.083 20147969.977 -29678594.7674 20147970.2814											
-34642202.746 23479338.891 -26972367.3494 23479343.8204											
-8256352.111 22876974.961 -6407292.0364 22876978.9264											
02 3 9 0 0 30.0000000 0 9G 1G 2G 3G13G15G17G22G25G31											
-18996599.842 23285030.305 -14779913.4304 23285036.4574											
-20169633.218 22312814.289 -15696125.7734 22312816.5204											
-29491409.795 20472020.492 -22953070.8264 20472021.2624											
-10637593.658 23496417.016 -8270399.8264 23496422.1414											
-21630668.096 21802383.391 -16831199.5264 21802386.2814											
-19499052.601 22666645.828 -15172504.5494 22666649.8954											
-38130257.857 20146032.672 -29686528.6554 20146032.7624											
-34582446.198 23490710.375 -26925804.0954 23490716.3754											
-8402040.859 22849250.078 -6520815.5944 22849255.3554											
:											
02 3 9 23 59 29.9900000 0 9G 1G 2G 3G13G15G17G22G25G31											
-18706895.538 20462406.670 -14554125.1934 20462412.1004											
-21183860.749 19290659.584 -16489669.9354 19290661.8464											
-29812085.495 17530179.342 -23207854.8014 17530180.7914											
-10609857.113 20624342.990 -8251753.1094 20624348.6974											
-21765010.581 18896430.287 -16939604.6434 18896433.2364											
-19489631.437 19786745.834 -15168497.2634 19786750.7914											
-38062023.262 17292433.022 -29633250.5804 17292433.9634											
-34324796.988 20720800.162 -26724807.5224 20720807.3774											
-9201828.989 19839080.568 -7148220.8984 19839084.7174											
											データの終わり

TEC データ

TEC file : 00010010.00_TEC										受信機名(4)+日(3)+0.年(2)	
1		TEC DATA		GPS		TEC VERSION / TYPE				TEC データの単位 フラグの種類	
RNX2TEC V2.0		KYOTO UNIV.		PGM / RUN BY							
0		TEC values in 10 ⁻¹⁶ el/m ² (1 TEC Unit)				EXPONENT OF TECU					
		TEC Status Flag = 0 : Normal data				COMMENT					
		= 1 : Lack of observables (TEC=999.)				COMMENT					
		= 2 : Too large TEC (TEC=999.)				COMMENT					
		= 5 : Cycle slip is repaired				COMMENT					
		= 6 : Beginning of arc				COMMENT					
00013650.990		00010010.000		00010020.000		RINEX FILE NAME				用いた RINEX ファイル名 観測点名	
0001						MARKER NAME					
		Z-X113		1F701D0		REC # / TYPE / VERS					
						ANT # / TYPE					
-3522938.4623		2777217.7381		4518996.5289		APPROX POSITION				観測点の 3 次元座標値	
XYZ						# / TYPES OF				観測量の種類数/観測量	
5		L1		L2		C1		P1		P2	
OBSERV											
30											
2000		1		1		0		0		.000000	
0		1		1		0		0		.00000000	
38.5838		0				1		6		21 05 09 29 23 30	
34.8837		0									
36.3796		0									
28.8532		0									
47.4401		0									
52.3078		0									
0		1		1		0		30		.00000000	
38.6547		0				0		6		21 05 09 29 23 30	
34.8317		0									
36.5216		0									
28.8847		0									
47.6135		0									
52.1155		0									

主要出版論文

- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, Kubota, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Tsugawa, S. Fukao, T. Ogawa, M. Ishii, T. Sakanoi, and S. Miyazaki, Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 689-692, 2001.
- Sahai, Y., K. Shiokawa, Y. Otsuka, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, A. Saito, Imaging observations of midlatitude ionospheric disturbances during the geomagnetic storm of February 12, 2000, *J. Geophys. Res.*, **106**, 24,481-24,492, 2001.
- Noguchi, K., T. Imamura, K.-I. Oyama, A. Saito, Application of the GPS network to estimate the effect of the terrestrial ionosphere on the radio occultation measurements of planetary ionospheres, *Radio Sci.* **36**, 1607-1613, 2001.
- Saito, A., *F*-region radio and optical measurement of nighttime TID campaign, *Earth Planets Space*, **54**, i-ii, 2002.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki, and M. C. Kelley, Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime *F*-region ionosphere with the MU radar and a GPS network, *Earth Planets Space*, **54**, 31-44, 2002.
- Ogawa, T., N. Balan, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C. Ihara, T. Shimomai, and A. Saito, Observations and modeling of 630 nm airglow and total electron content associated with traveling ionospheric disturbances over Shigaraki, Japan. *Earth Planets Space*, **54**, 45-56, 2002.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, M. K. Ejiri, Y. Sahai, T. Kadota, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, and A. Saito, Imaging observations of the equatorward limit of midlatitude traveling ionospheric disturbances, *Earth Planets Space*, **54**, 57-62, 2002.
- Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth Planets Space*, **54**, 63-70, 2002.
- Balan, N., Y. Otsuka, T. Tsugawa, S. Miyazaki, T. Ogawa, K. Shiokawa, and G. J. Bailey, Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan, *Earth, Planets, and Space*, **54**, 71-79, 2002.